

Etude multi-échelle de la réaction sulfatique interne dans les bétons

Loïc Divet (Université Gustave Eiffel) et Jacques Jabbour (IRSN)

Introduction

✓ Constat

- ✓ La RSI : un processus de vieillissement faisant appel à des notions multi-échelles (micro, méso, macro/ouvrage)
- ✓ L'élévation de température génère des modifications dans la microstructure des bétons résultant de processus chimique, thermique et hydrique

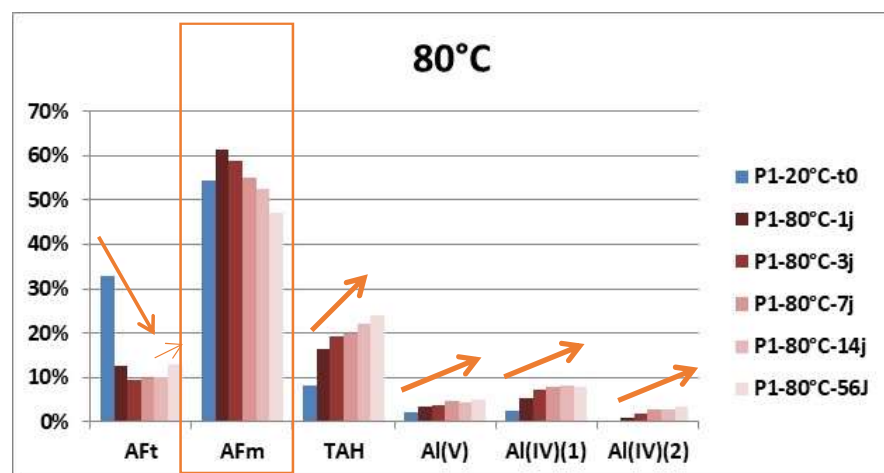
✓ Objectifs

- ✓ Mieux comprendre ces transformations physico-chimiques et minéralogiques
- ✓ Mieux comprendre l'effet d'échelle sur la cinétique et l'amplitude des gonflements (existence de gradients thermiques, hydriques, alcalins, expansion, ...)
- ✓ Des données nécessaires pour améliorer la modélisation

A l'échelle de la pâte de ciment

Essais à 80°C sur pâte CEM I : 1, 3, 7, 14 et 56 jours

RMN MAS ^{27}Al



AFt = E

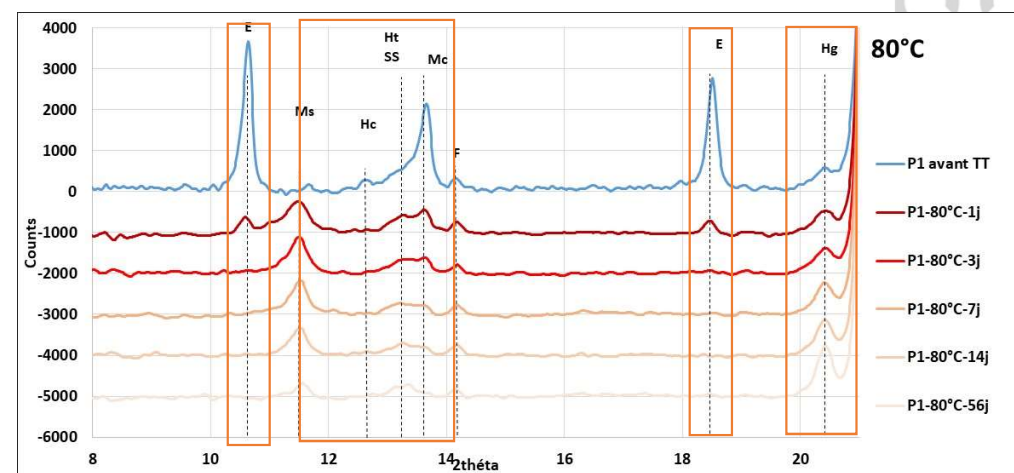
AFm = Ms+Mc+Hc

TAH = phase amorphe

Al(V)+Al(IV) = Al CSH

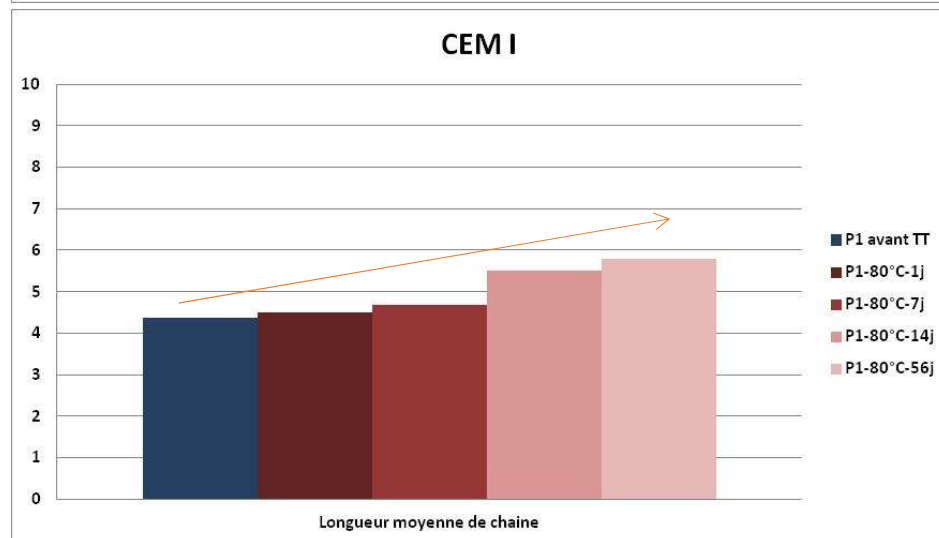
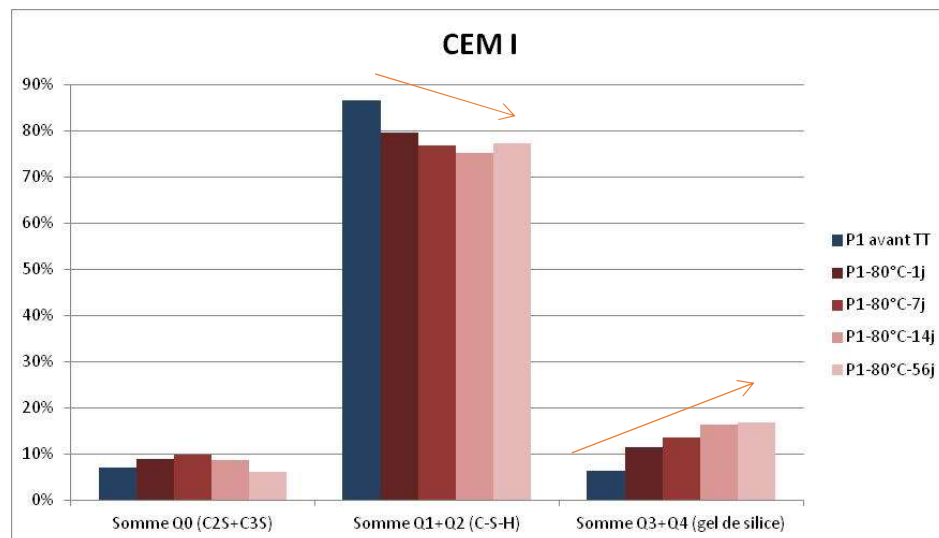
- Il reste des phases AFt (à l'état amorphe)
- La quantité de phase AFm est vue en global
- Augmentation TAH et Al dans les C-S-H

DRX



- Il n'y a plus d'ettringite détectée (à l'état cristallisé)
- Evolution en détail des phases AFm:
 - => Mc et Hc disparaissent
 - => Ms augmente les 1^{ers} jours puis diminue
- Augmentation lente d'hydrogrenat

A l'échelle de la pâte de ciment



Essais à 80°C sur pâte CEM I : 1, 3, 7, 14 et 56 jours

RMN MAS ^{29}Si (R0 = 5 500 Hz)

Q⁰: C₂S+C₃S = phases anhydres

Q¹ et Q²: C-S-H = phase hydratée

Q³ et Q⁴: Gel de silice = phases issues de la dégradation des C-S-H

Diminution des C-S-H et Augmentation du gel de silice

Augmentation de la longueur moyenne de chaines de C-S-H

=> Polymérisation des chaines de C-S-H due au départ d'eau, réversibilité ?

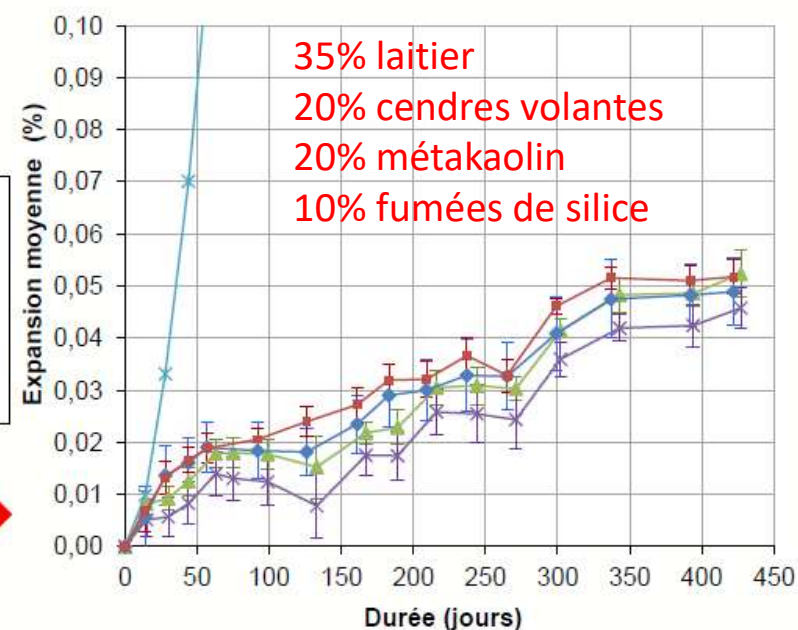
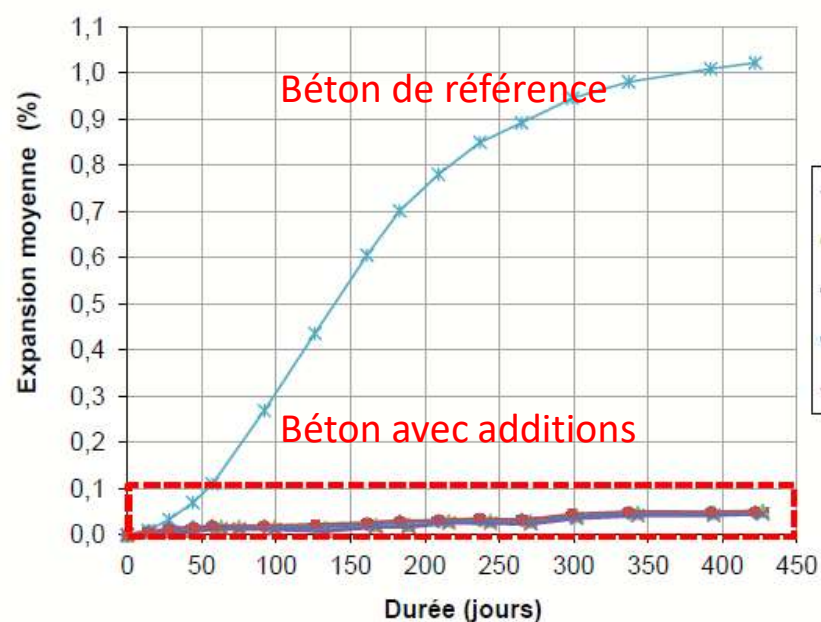
A l'échelle de l'éprouvette de béton

• Rôle des additions minérales dans le ciment et le béton ?

• Additions hydrauliques et pouzzolaniques :

- Effet inhibiteur → Mode d'action ?
- Relation entre quantité nécessaire et teneur en C_3A , SO_3 et $Na_2O_{\text{équivalent}}$ dans le clinker

Etude FNTP – 75°C - Ciment CEM I (10 % C_3A , 3,5% SO_3) + additions minérales

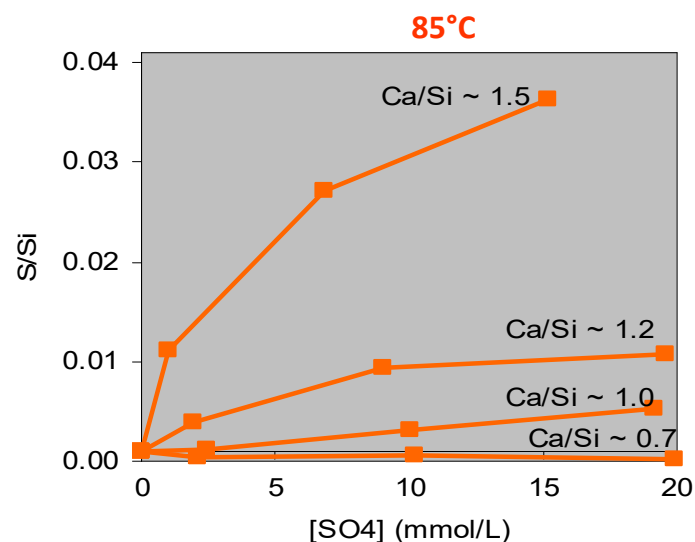


A l'échelle de l'éprouvette de béton

• Rôle des additions minérales dans le ciment et dans le béton ?

• Modes d'action des additions pouzzolaniques ?

- Effet de dilution (C_3A , SO_3 , alcalins)
- Diminution de l'alcalinité de la solution interstitielle du béton due à la réaction pouzzolanique
- Diminution de la teneur en portlandite
- Modification de la structure des C-S-H



Influence du rapport C/S des C-S-H sur les isothermes d'adsorption des ions SO_4^{2-} (Barbarulo, 2002)

→ La capacité d'adsorption augmente avec le rapport C/S des C-S-H

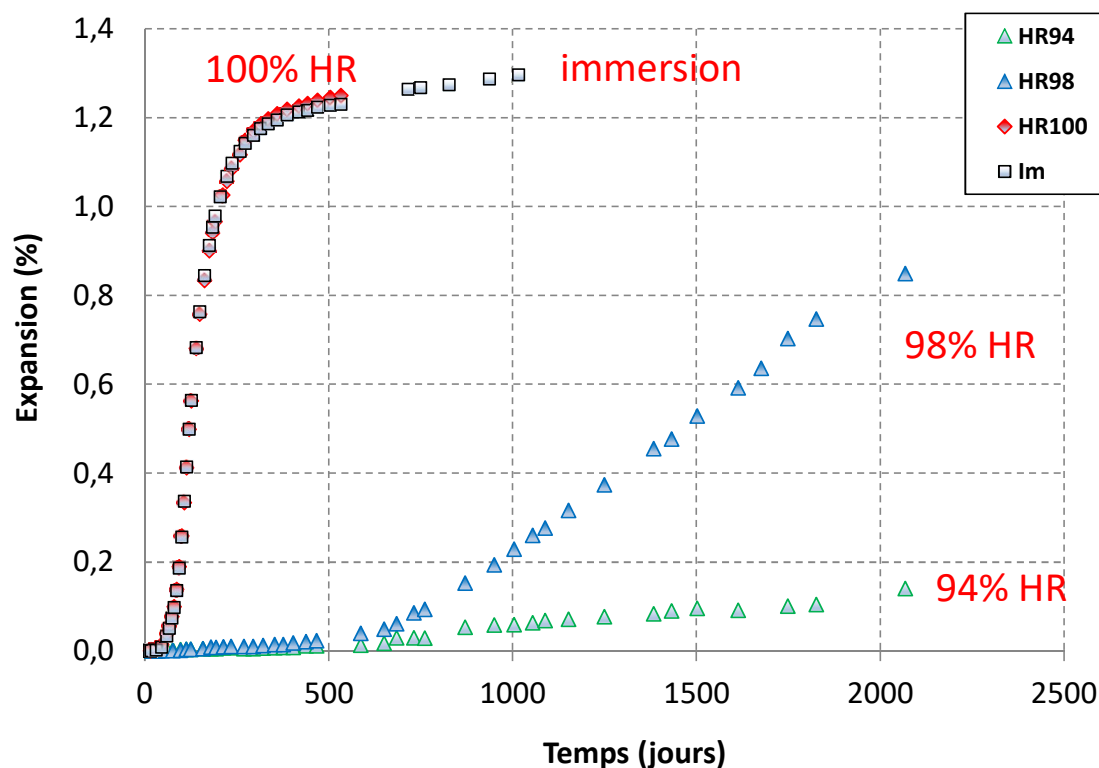
→ Le rapport C/S des C-S-H diminue avec les additions pouzzolaniques et les laitiers de haut fourneau

A l'échelle de l'éprouvette de béton

Rôle de l'eau : Effet de l'hygrométrie environnante sur la RSI pour un béton réactif

Al Shamaa et al., 2012

Variations dimensionnelles (ME des LPC n°66) : **suivi sur 6 ans !**

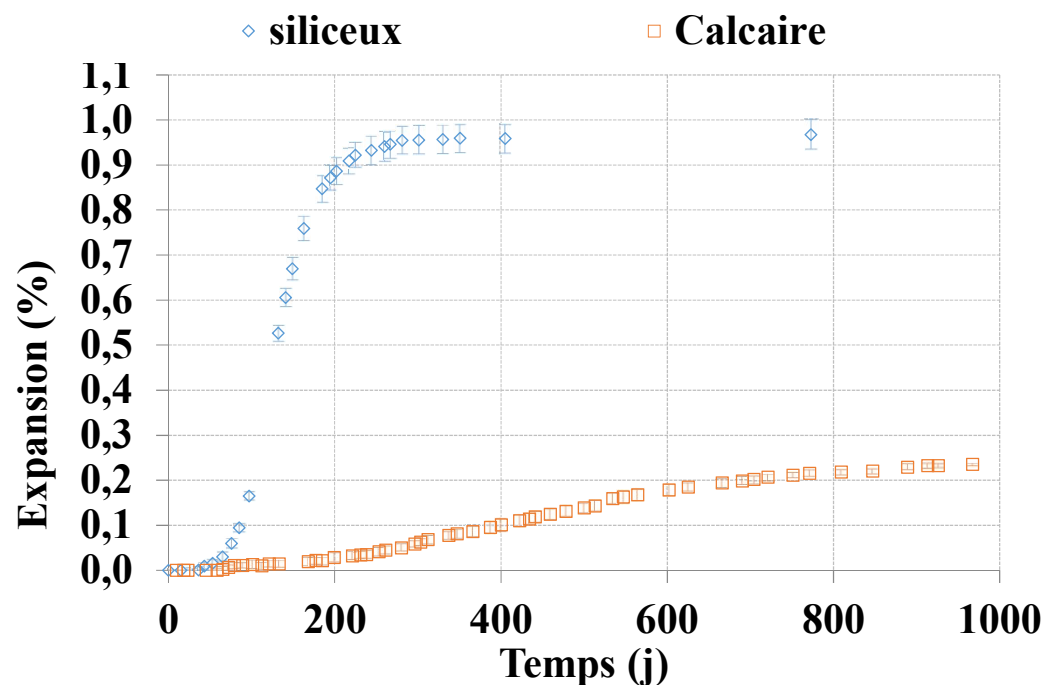


- 100% HR et immersion: même impact
- 94 et 98% HR: Effet sur la cinétique et l'amplitude + temps de latence (500 j)

A l'échelle de l'éprouvette de béton

- Rôle de la nature des granulats : **suivi sur 3 ans**

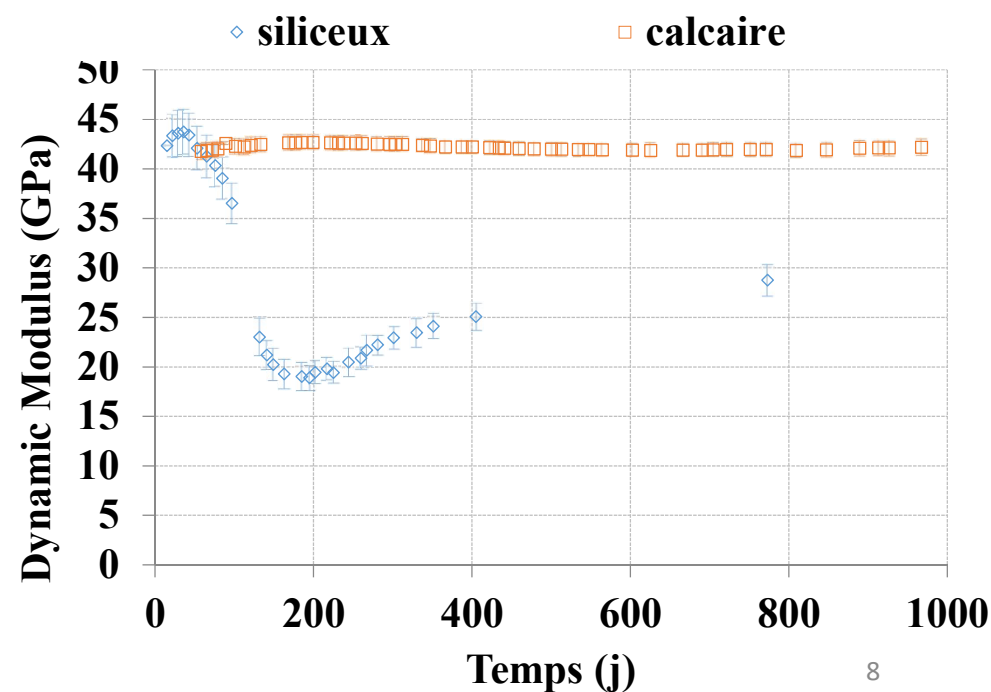
Malbois et al., 2019



Evolution comparée des expansions

→ Un endommagement du matériau pour les bétons avec granulats siliceux

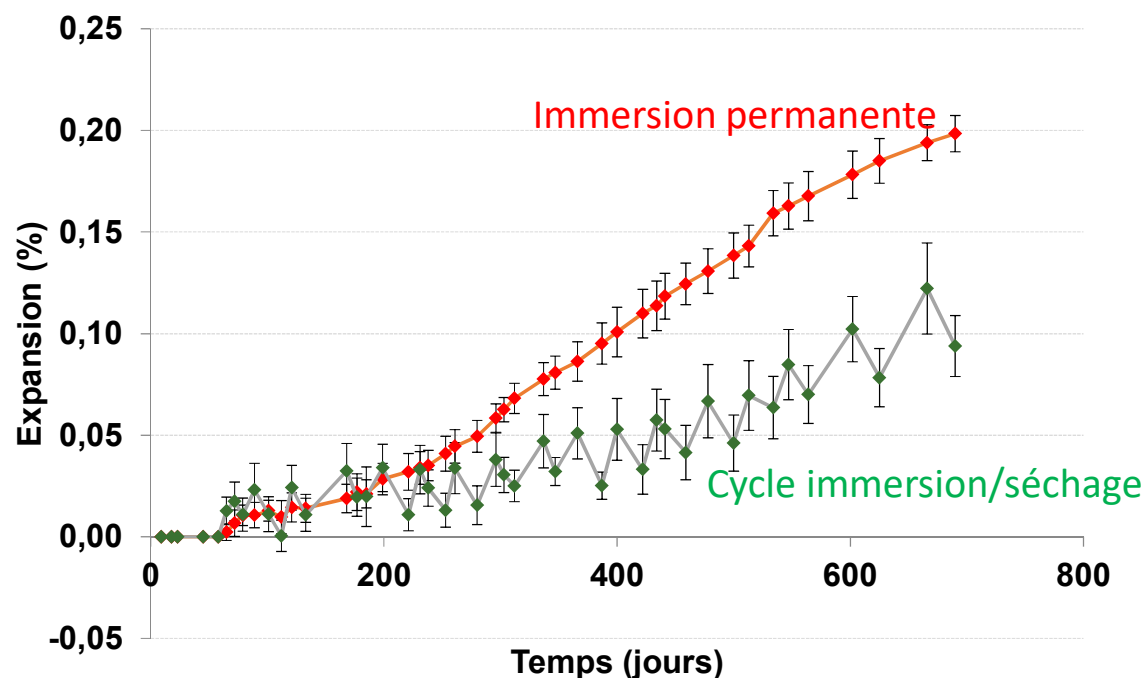
Evolution comparée des modules dynamiques



A l'échelle de l'éprouvette de béton

• Rôle des cycles humidification / séchage

Malbois et al., 2019



Béton avec granulats calcaires

➔ Se rapprocher des structures qui ne sont pas en contact permanent avec l'eau

Cycles d'humidification / séchage :

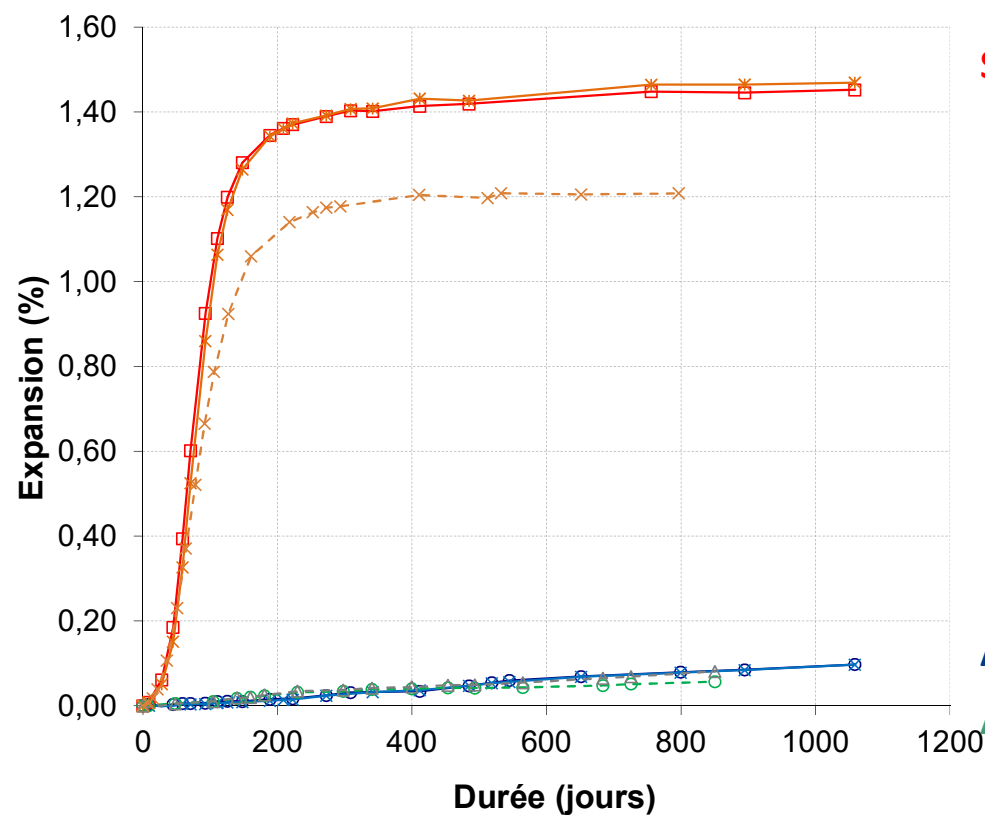
- Immersion dans l'eau à 23°C durant 7 à 38 jours
- Séchage à 23°C et 50% HR durant 7 à 38 jours

➔ Le cycle de séchage limite la RSI

➔ Effet des cycles d'humidification / séchage sur la cinétique de la RSI

A l'échelle de l'éprouvette de béton

- Rôle des alcalins : traitement thermique (80°C, 3 j) avec et sans revêtement de protection



Sans revêtement B1

0,21 Na₂O_{eq}/ciment (%)

Sans revêtement B2

Même famille de produits
fournie par 2 fabricants :

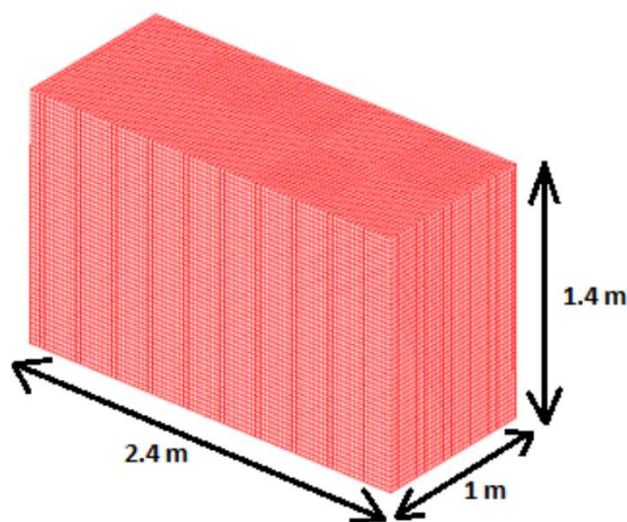
0,38 Na₂O_{eq}/ciment (%)

Avec revêtement B1 (Fabricant X)

Avec revêtement B2 (Fabricant Y)

Passage à l'échelle d'une structure massive

- Construction d'une maquette représentative d'un ouvrage massif



- formulation du béton:
 - composition chimique propice au déclenchement de la RSI
 - granulats calcaire

- Profil thermique au jeune âge : chauffage à 80°C pendant 3 jours puis refroidissement
- Environnement de conservation : maquette immergée dans une piscine maintenue à 20°C
Renouvellement de l'eau tous les mois

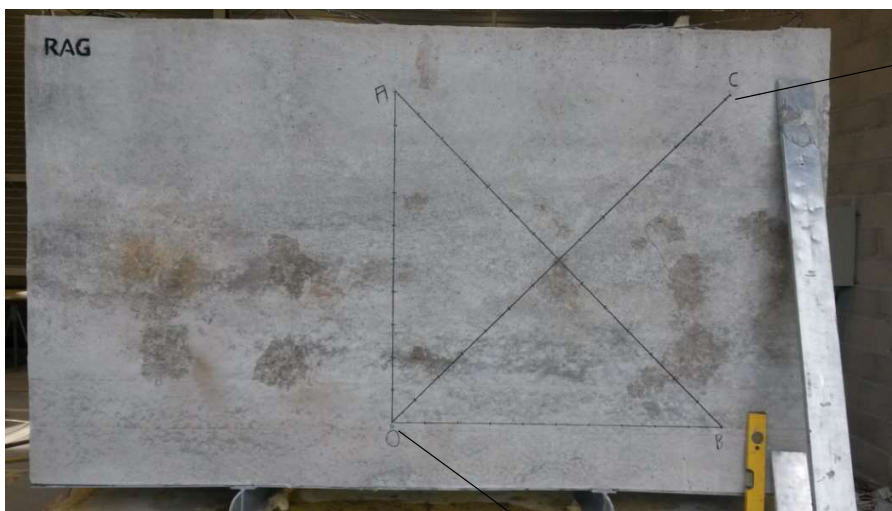
Passage à l'échelle d'une structure massive

- Instrumentation de la maquette



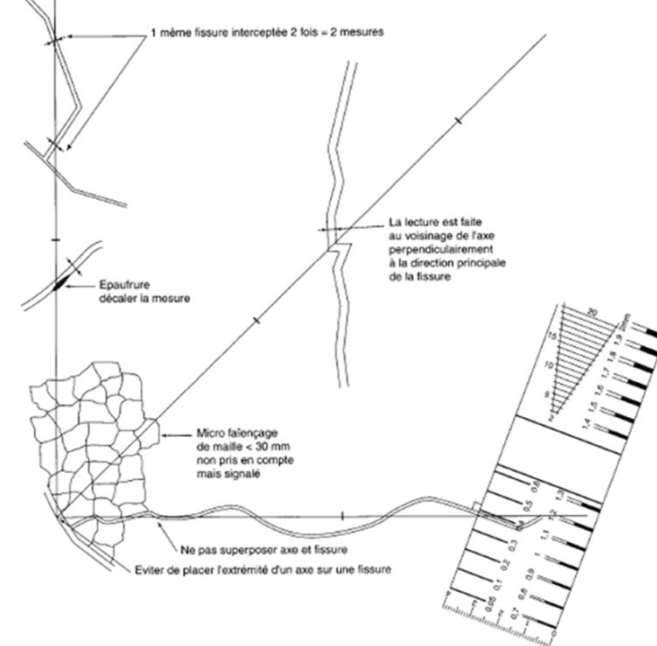
Passage à l'échelle d'une structure massive

- Suivi macroscopique de la fissuration



Nombre et Ouverture des fissures

Indice de fissuration



(Méthode d'essai des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°47)

Passage à l'échelle d'une structure massive

- Réalisation de la maquette



système de chauffage (jeune âge)



système de régulation



Environnement de conservation des maquettes

Passage à l'échelle d'une structure massive

Échelle Structure: maquettes

- Suivi de déformation (Cordes Vibrantes 1D)
- Suivi de fissuration (Indice de fissuration)



Champs de Déformations (F.Optiques)

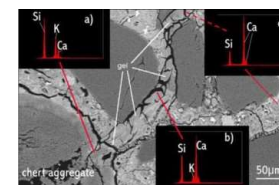
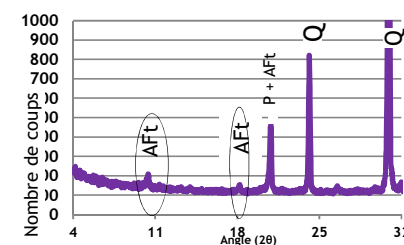
Échelle Éprouvette: Carottage

- 3 carottes par maquette
- *Méthode d'essais LCPC 67*
- Gonflement résiduel



Echelle Microscopique

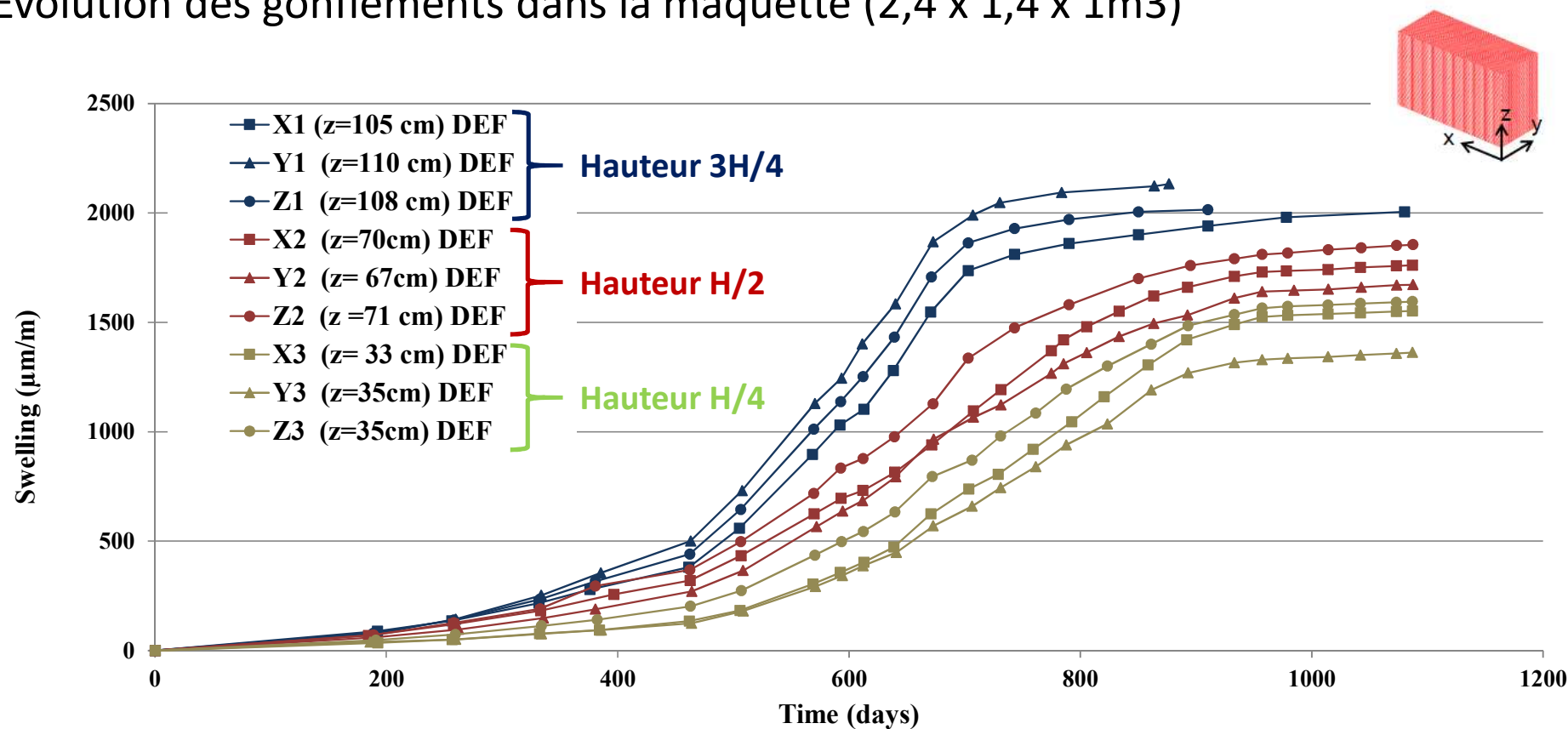
- Observations au **MEB**
- Analyse par **DRX**



[Moranville et Damidot, 2003]

Passage à l'échelle d'une structure massive

- Évolution des gonflements dans la maquette (2,4 x 1,4 x 1m³)



➤ Gonflement anisotrope

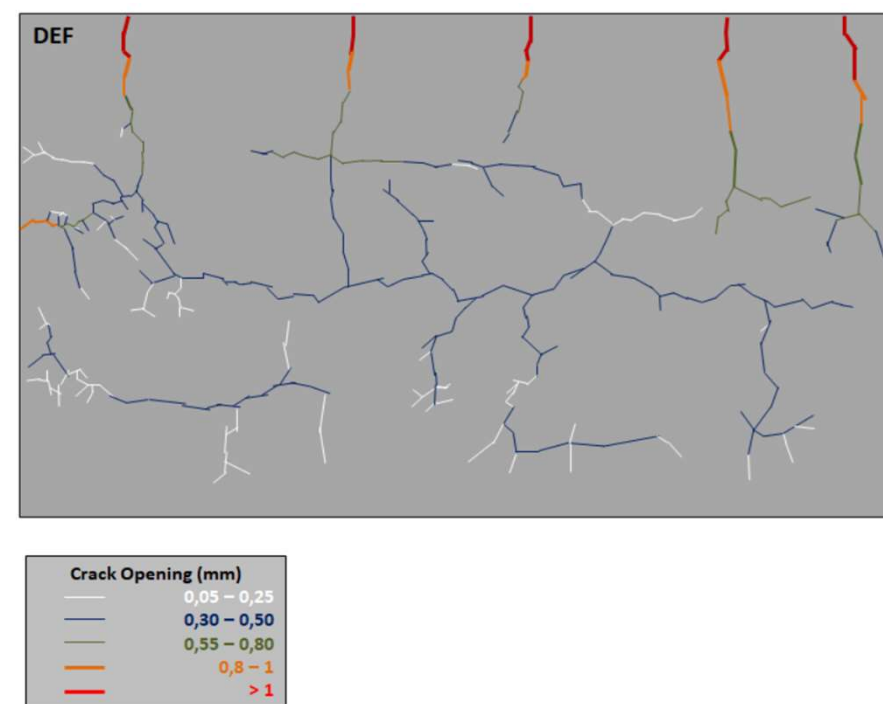
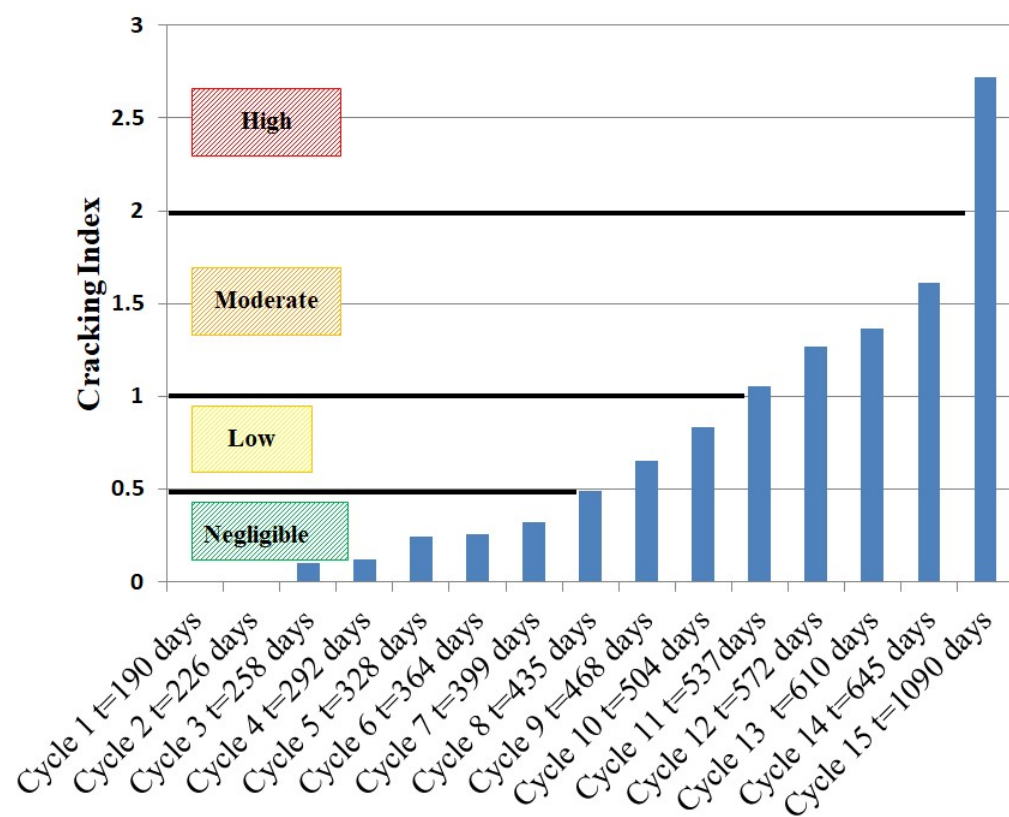
Passage à l'échelle d'une structure massive

- Après 1195 jours de vieillissement accéléré...



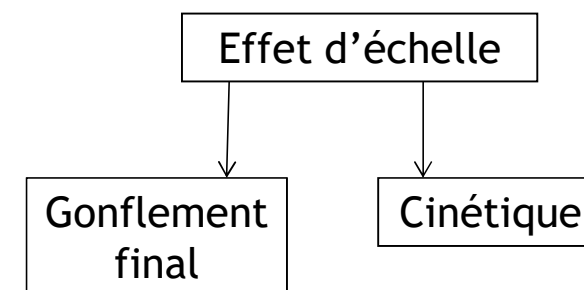
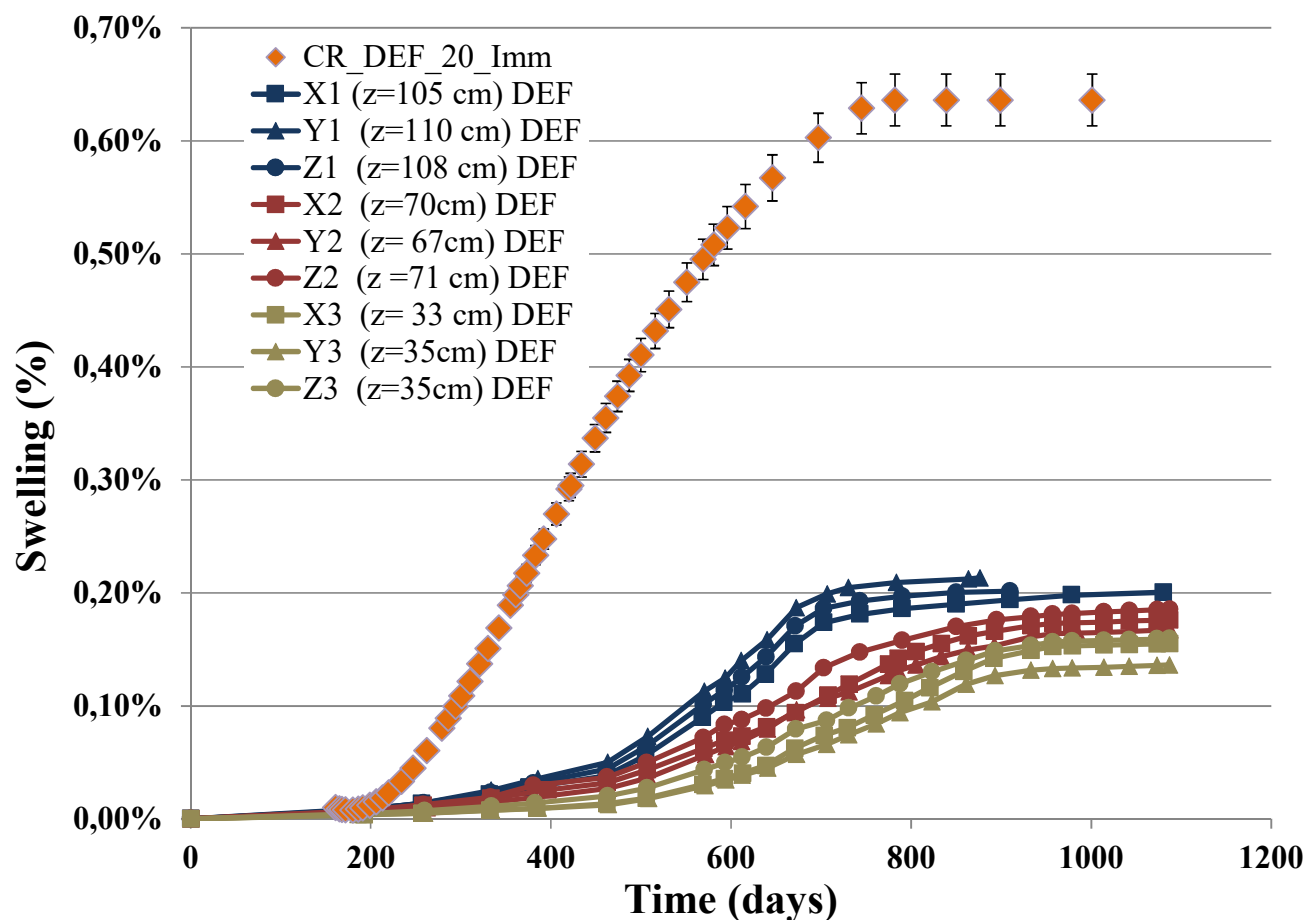
Passage à l'échelle d'une structure massive

- Evolution de l'indice de fissuration de la maquette



Passage à l'échelle d'une structure massive

- Maquette vs éprouvette (essais de gonflement résiduel sur carotte extraite Ø11H22)



Passage à l'échelle d'une structure massive

- **Les hypothèses expliquant l'effet d'échelle :**
 - Différentes cinétiques de transferts ioniques entre le béton et l'environnement de conservation
 - Phénomènes diffusives (impact du rapport Volume/surface)
 - Différentes cinétiques de lixiviation d'alcalins
 - Impact sur la stabilité de l'ettringite
 - Différentes réponses mécaniques à la sollicitation en traction du béton
 - Impact sur l'ouverture des fissures → Création de vase d'expansion (relâchement des pressions)
 - Impact sur la cinétique
 - Effets mécaniques (conditions aux limites, confinement...)

Conclusion 1/2

- **Meilleure compréhension de l'influence de certains paramètres**
 - Impact de la température sur l'ettringite primaire (SO_3 et Al) et sur les C-S-H (polymérisation)
 - Rôle bénéfique des additions chimiquement réactives
 - Impact des granulats calcaires sur la cinétique et l'amplitude du gonflement
 - Effet des cycles d'immersion séchage sur la cinétique
- **Quel mode d'action pour limiter la RSI (Perspectives à confirmer)**
 - Limiter la lixiviation des alcalins
 - Abaisser l'humidité relative des bétons : $\text{HR} < 90 - 95 \%$

Conclusion 2/2

- Les éprouvettes de laboratoire ne permettent pas de reconstituer les conditions réelles de l'ouvrage dans son environnement (transferts ioniques, rapport volume/surface, contraintes mécaniques, retrait/fluage...)
- Le programme expérimental réalisé a permis de confirmer un effet d'échelle sur la cinétique et le gonflement dus aux RGI.

Merci pour votre attention